

岩坡稳定的层分析方法与抗滑系数图谱

Layer analysis method for rock slope stability and the image and spectrum of slide resistance factor

李冬田, 余运华
(河海大学 土木学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 提出了应用岩坡多层 DEM 几何模型, 参照简化 Bishop 法的假定, 进行岩坡稳定分析的层分析方法。该方法是一种三维的岩坡极限平衡分析法。进而提出了抗滑系数图和抗滑系数谱的概念, 以反映碎裂岩体稳定因素的不均匀性。

关键词: 多层 DEM 模型; 边坡稳定分析; 层分析; 抗滑系数图; 抗滑系数谱

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)01-0018-05

作者简介: 李冬田, 男, 1938 年生。1964 年清华大学研究生毕业, 现为河海大学教授, 从事遥感与地理信息系统在水文工程地质方面的研究。

LI Dong-tian, YU Yun-hua

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: By using the geometric model of multi-DEM and referring to the hypothesis of Bishop's simplified method the layer analysis method for rock slope stability is presented. It is a three dimensional limit equilibrium analysis for rock slope. Further suggested are the conceptions of the image and the spectrum of slide resistance factor to illustrate the unevenness of the stability of cataclastic rock slope.

Key words: multi-DEM model; analysis of slope stability; layer analysis; image of slide resistance factor; spectrum of slide resistance factor

1 引 言*

基于极限平衡理论的岩坡稳定分析, 在习惯上多采用平面(二维)分析的方法。70 年代以来有一些三维边坡稳定分析的研究, 如 Hovland(1977), Chen & Chameau(1982), Hungr(1987) 等等。这些三维分析方法主要研究了在几何形态上的三维岩体的稳定分析公式, 而较少研究岩体物理力学参数的三维分布。就其计算结果而言, 总体上三维分析的安全系数比二维分析的大, 当滑坡体宽度相当大时, 三维分析的安全系数接近二维分析的结果^[1-3]。在实际应用中, 这些三维方法尚应用得不多。

笔者探讨了应用层分析(layer analysis)进行岩坡稳定分析的方法^[4,5]。这种方法不仅在几何形态上细致地模拟岩体, 而且在岩体物理力学参数和孔隙水压力的三维分布方面, 也可以尽量细致地进行模拟。由于这种方法分析过程的可视性, 本文导出了抗滑系数图和抗滑系数谱的概念, 这有助于岩体稳定的分析、监测和处理。

研究岩坡稳定的层分析方法, 是在用 GIS 方法建立岩坡空间信息系统(RSIS)^[4], 编制岩体多层 DEM 模型^[5]的基础上进行的。所谓多层 DEM 模型, 即对地面和每一个重要结构面都编制独立的数字高程模型(DEM - Digital Elevation Model), 所有这些 DEM 都有完全一致的参照系并互相准确地配准, 由多层 DEM 构成一个整体的、三维的岩体几何模型。这种多层 DEM 模型, 可反映岩体各块体(或层体)的厚度、结构面的产状、坡度

等空间分布的信息。在 RSIS 中, 还可以编制与多层 DEM 匹配的各种岩体物理力学参数空间分布的数字模型, 如各结构面摩擦系数与粘结力的数字模型 DEM 和 DCM 等。当地下水水位出现高于可能的滑动面的情况时, 还应编制地下水位的数字模型(DHM)。当包气带孔隙水压力观测资料相当多时, 可编制孔隙水压力数字模型等。所谓岩体稳定的层分析方法, 即通过对上述数字模型(层)的有序运算, 进行岩体稳定分析的方法。

正如各种二维的岩体极限平衡稳定分析公式有各自不同的力学假定一样, 三维的层分析方法也有多种计算公式, 即根据不同的力学平衡条件的假定, 有不同的层分析计算公式。笔者曾推出参照简化 Bishop 法和瑞典法假定为条件的层分析公式^[5]。本文拟叙述以类似简化 Bishop 法假定为条件的层分析法, 讨论其计算结果, 进而提出与其相关的抗滑系数图谱计算式。

2 以类似简化 Bishop 法假定为条件的层分析公式

为进行三维分析, 定义: 沿不稳定块体最易滑动的方向为 Y 轴; 与 Y 轴垂直的方向为 X 轴, 与 X-Y 平面垂直的方向为 Z(或 H) 轴。

参照二维的简化 Bishop 法, 假定: ①考虑岩体滑动

力矩的极限平衡,其滑动轴平行于 X 轴;②用 $X-Y$ 网格,将岩体分割为许多直立岩柱,在单岩柱铅垂方向的平衡方程中,岩柱侧面的正应力和切应力可以忽略。

根据上述假定,岩坡的三维稳定分析可表述为两种层分析计算式:

2.1 根据 Hungr 公式(1977)推导的层分析计算式

Hungr 依据简化 Bishop 法的假定,推导出以下三维稳定分析公式^[3]:

$$K = \frac{\sum (W_a - uA \cos \alpha_s) \tan \phi + c' A \cos \alpha_s / m_a^{-1}}{\sum W_a \sin \alpha_y}$$

$$m_a = \cos \alpha_s (1 + \sin \alpha_y \tan \phi / K \cos \alpha_s)$$

式中 所有下标 y 已省略; K 为安全系数; W_a 为岩柱重; u 为孔隙水压力; A 为岩柱底面面积; α_s 为该岩柱底部滑面的倾角; α_y 为岩柱底部滑面沿滑动方向的视倾角; $\tan \phi$ 和 c' 为滑面的有效摩擦系数与有效粘聚力。

若 a 为岩柱的水平截面积,则 $a = A \cos \alpha_s$ 。

令 W 为单位水平截面积的岩柱重, $W = W_a / a$; 考虑坡上建筑物荷重 ($T = T_a / a$), 又考虑水平地震力的影响, 则上式可写为

$$K = \frac{\sum (W + T - u) \tan \phi + c'}{(\cos \alpha_s + \sin \alpha_y \tan \phi / K')^{-1} / \sum (W + T) \sin \alpha_y + \eta (W + T) R_d / R}$$

式中 所有的下标 y 同样已省略; η 为水平地震系数; R 为滑面曲率半径; R_d 为水平地震力力矩的力臂。

层分析的运算(层运算 layer calculation)为图层与图层的运算。为便于表达,所有的图层(数字模型)都写为 $[?]$ 。“?”在公式中为符号,在具体分析计算时为该数字模型的文件名。

将 K 的表达式写为层运算式:

$$K = \frac{\sum_{DM} (([W] + [T] - [U]) [\tan \phi] + [c'])}{([\cos \alpha_s] + [\sin \alpha_y] [\tan \phi] / K')^{-1} / \sum_{DM} ([W] + [T]) [\sin \alpha_y] + \eta ([W] + [T]) [R_d / R]} \quad (1)$$

或写为

$$K = \frac{\sum_{DM} (([W] (1 - [\gamma_u]) + [T]) [\tan \phi] + [c'])}{([\cos \alpha_s] + [\sin \alpha_y] [\tan \phi] / K')^{-1} / \sum_{DM} ([W] + [T]) [\sin \alpha_y] + \eta ([W] + [T]) [R_d / R]} \quad (2)$$

在式(1), (2)中, $\left| (([W] + [T] - [U]) [\tan \phi] + [c']) ([\cos \alpha_s] + [\sin \alpha_y] [\tan \phi] / K')^{-1} \right|$ 和 $(([W] + [T]) [\sin \alpha_y] + \eta ([W] + [T]) [R_d / R])$ 计算的结果都是数字模型, $\sum_{DM}$ 表示对该数字模型中的所有数字进

行累计(在文献[4, 5]中按某些 GIS 软件中相关命令缩写为 tal)。

$[W]$ 为块体重量的数字模型,当块体可视为均质时, $[W] = [B] \times \gamma$ 。 $[B]$ 为块体厚度数字模型; γ 为容重。当块体由多层不同容重的岩石(或土层)构成时, $[W] = [B1] \times \gamma_1 + [B2] \times \gamma_2 + \dots + [Bn] \times \gamma_n$ 。 $[W]$ 在地下水位以下部分, γ_i 为饱和容重。

$[T]$ 为坡体上建筑物荷重的数字模型。

式(1), (2)中 $[c']$ $[\tan \phi]$ 分别为滑动面上有效粘滞系数和有效摩擦系数的数字模型。在应用层分析方法时,滑面上各点的 c' 和 $\tan \phi$ 可以是不同的,在滑面地质构造状况较复杂,或研究复合滑坡时,应根据地质构造和勘测试验资料编制 c' 和 $\tan \phi$ 的平面分布图,并转换为数字模型。

式(1)中, $[U]$ 为滑面上孔隙水压力分布的数字模型, 计算式如下:

$$[U] = \text{pos}([H] - [S]) \quad (3)$$

式中 $[H]$ 为坡体中地下水水位的数字模型; $[S]$ 为滑坡面高程的数字模型; pos 为负值赋 0 命令, 即令该数字模型中所有小于 0 的数字为 0^[4]。

式(2)中, $[\gamma_u]$ 为孔隙水压力系数分布的数字模型, 可根据观测资料编制。当坡体中孔隙水压力系数 γ_u 可视为均一时, $(1 - [\gamma_u])$ 可写为 $(1 - \gamma_u)$ 。

$[R_d / R]$ 为沿滑动方向的剖面上有关力臂的数字模型。因为实际滑面往往不是规则的弧面, 应用层分析法, 可以考虑各点的滑面曲率半径 R 是不同的。 $R = dl / d\alpha_y$ (l 为弧长)。设岩柱在 Y 轴方向的水平宽度恒为 e 。为避免滑面坡度突变点对计算的影响, 计算中规定 $\Delta \alpha_y = \alpha_{y+2} - \alpha_{y-2}$ 。因 $\Delta \alpha_y$ 相当小, 则

$$R_i \approx 4e \sec \alpha_y \Delta \alpha_y^{-1}$$

R_d 为水平地震力力矩的力臂, $R_{di} = R_i \cos \alpha_y - h_i / 2$, 式中 h_i 为岩柱高度, 经整理得

$$R_{di} / R_i \approx \cos \alpha_y (1 - \Delta \alpha_y h_i / 8e)$$

$$[R_d / R] \approx [\cos \alpha_y] (1 - [\Delta \alpha_y] [B] / 8e) \quad (4)$$

虽然在简化 Bishop 法单岩柱竖直方向的力平衡方程中, 将岩柱侧壁上所有垂向和切向力在竖直方向上的合力视为“0”, 但安全系数方程计算的结果仍然反映了一部分侧壁上的竖向力。在上述三维方程中也同样反映了一部分 X 和 Y 两个方向侧壁上的竖向力^[1]。 Hungr 三维方程强调了坡体滑移的整体性, 因此其计算结果往往比二维分析结果大得多。

2.2 碎裂岩坡体稳定的三维层分析计算式

如上述, 由 Hungr 公式导出的式(1), (2), 仍然反映了一部分岩柱侧壁上的力。其原因是其力平衡方程中

的滑面反力“ N ”包含了 X 方向的分力(见文献[1])。在实际工程中, 碎裂岩体坡体的失稳, 往往不具有整体性。

Chen & Chameau(1982) 和 Hungr(1987) 等都证明, 岩体的有效粘结力 c' 对岩体稳定影响很大, 当岩体的有效粘结力 c' 相当小时, 三维分析结果与二维分析结果较接近。因此, 可以对碎裂岩体考虑为这样的力学机制: 假定岩体在 Y 和 Z 方向的受力机制与二维简化 Bishop 法的假设完全相同; 在平衡方程中, 岩体中每个 $Y-Z$ 分割面上的法向力和切向力, 均被忽略; 认为岩体中任何单元无 X 方向的运动。即将坡体考虑为被分割成平行于 Y 的一系列滑带, 忽略滑带间的作用力。这样, 碎裂岩体的三维极限平衡公式可写为

$$K = \frac{\sum (W_{aj} - u_{aj} a f_{ij}) \tan \phi + c' q_{ij} m_{ij}^{-1}}{\sum W_{aj} \sin \alpha_{ij}}$$

$$m_{ij} = \cos \alpha_{ij} (1 + \tan \alpha_{ij} \tan \phi / K')$$

式中 f_{ij} 为岩柱底面积的校正系数, $f_{ij} = \cos \alpha_{ij} / \cos \alpha_{sj}$ 。

考虑建筑物荷重 T 和水平地震力后, 将此式改写为层运算式:

$$K = \frac{\sum_{DM} \left(([W] + [T] - [U][f]) [\tan \phi] + [c'] [f] / ([\cos \alpha_j] (1 + [\tan \alpha_j] [\tan \phi] / K')) \right)}{\sum_{DM} \left(([W] + [T]) [\sin \alpha_j] + \eta ([W] + [T]) [R_d/R] \right)} \quad (5)$$

$$\text{或 } K = \frac{\sum_{DM} \left(([W] (1 - [v_u]) + [T]) [\tan \phi] + [c'] [f] / ([\cos \alpha_j] (1 + [\tan \alpha_j] [\tan \phi] / K')) \right)}{\sum_{DM} \left(([W] + [T]) [\sin \alpha_j] + \eta ([W] + [T]) [R_d/R] \right)} \quad (6)$$

式中 $[f] = [\cos \alpha_j] / [\cos \alpha_s]$ 。

式(5), (6) 是碎裂岩体的极限平衡计算式, 它计算的安全系数 K 较式(1), (2) 计算的结果小(见后实例)。式(5), (6) 与式(1), (2) 的不同, 仅在于它基本不考虑 $Y-Z$ 面上的侧向力的影响, 因而较适合于碎裂岩体的分析。

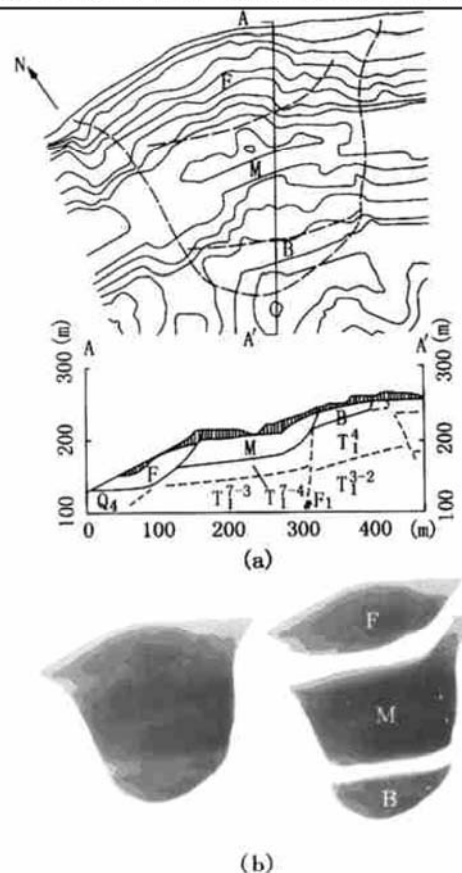
式(5), (6) 与式(1), (2) 都是基于简化 Bishop 法假定的三维稳定分析式, 与 Bishop 法不同的是, Bishop 法要求滑面与 $Y-Z$ 面的交线为圆弧形, 而上述层分析计算式中, 滑面上各点的曲率半径可以各不相同, 每一个岩柱有各自不同的滑动和阻滑的力臂, 所以可以适用于滑面为任何形态的岩坡。

3 岩坡稳定层分析计算的步骤与实例

上述层分析式有相同的计算步骤: ①建立岩坡多

层 DEM 模型(参看文献[4])。②分析滑面的形态, 确定不稳定块体最容易发生滑动的方向。改变坐标系, 使该滑动方向平行于计算机台面的 Y 轴。③编制各参数层数字模型, 包括 $[\tan \phi]$ 、 $[c']$ 、 $[U]$ 等, 并计算 $[\alpha_j]$ 、 $[\sin \alpha_j]$ 、 $[\cos \alpha_j]$ 、 $[\tan \alpha_j]$ 、 $[f]$ 、 $[\Delta \alpha_j]$ 、 $[W]$ 、 $[T]$ 和 $[R_d/R]$ 等数据层。在编制所有的数据层时, 由于图像处理软件采取了不同的计算模型, 往往会在结果图像上出现“毛刺”, 将影响其后续的计算。应采用滤波的方法, 消除“毛刺”, 必要时可通过人工帮助进行编辑。④按公式计算 K , 通过迭代使 $K = K' \pm \varepsilon$ 。⑤改变地震力或孔隙水压力条件, 重复计算。⑥计算由不同结构面切割形成的不同块体的稳定性。

作为计算实例, 笔者应用黄委会勘测总队的资料, 对小浪底东苗家滑坡的稳定性进行了计算。该滑坡是由前后排列的三个块体构成的复合滑坡, 其结构如图 1 所示。构成该滑坡的岩体为三叠系砂岩, 节理很发育, 岩体多被切成 $1 \sim 2 \text{ m}^3$ 的块状, 并普遍有倾倒现象。根据岩体的结构, 主要采用了针对碎裂岩体的计算式(6)进行计算。部分计算结果见表 1 和表 2。



(a) 图为滑坡地形图与示意剖面图, 该滑坡为复合滑坡, 其中 F, M, B 分别表示前、中、后三个块体; (b) 图为滑坡体整体与三个块体的厚度数字模型(DTM), 为便于阅读, 以阶状图形式表示(阶高 10 m)。

图 1 东苗家滑坡的结构

Fig. 1 The structure of Dongmiaojia slide

表 1 当 $f_m = 0.22, 0.23, 0.25$, $c = 7 \text{ kPa}$ 时, 滑体总体的安全系数Table 1 Factors of safety for whole sliding mass
(f_m is the main friction factor of sliding face)

孔隙水压力系数	水平地震加速度系数	$f_m = 0.22$	$f_m = 0.23$	$f_m = 0.25$
0.00	0	1.136	1.169	1.242
	0.025	1.038	1.069	0.135
	0.05	0.955	0.983	1.045
0.10	0	1.019	1.049	1.114
	0.025	0.931	0.958	1.018
	0.05	0.856	0.881	0.935
0.20	0	0.903	0.929	0.986
	0.025	0.824	0.848	0.900
	0.05	0.757	0.779	0.826

注: f_m 为中后部滑面主体部分的摩擦系数, $[\tan \phi] = (f_m / f'_m) [\tan \phi]$, f'_m 为最初编制摩擦系数数字模型 $[\tan \phi]$ 时, 所采用的滑面主体部分的摩擦系数

表 2 当中后部滑面 $f_m = 0.22$, $c = 7 \text{ kPa}$ 时, 滑体的分块和总体的安全系数Table 2 Factors of safety for each block and the whole of sliding mass ($f_m = 0.22$, $c = 7 \text{ kPa}$)

孔隙水压力系数	水平地震加速度系数	前部滑体 (F)	中部滑体 (M)	后部滑体 (B)	总体
0	0	1.248	1.034	0.937	1.136
	0.025	1.178	0.942	0.877	1.038
	0.05	1.115	0.865	0.823	0.955
0.10	0	1.113	0.925	0.837	1.019
	0.025	1.050	0.843	0.782	0.931
	0.05	0.993	0.773	0.733	0.856
0.20	0	0.988	0.817	0.736	0.903
	0.025	0.931	0.743	0.687	0.824
	0.05	0.879	0.681	0.644	0.757

表 1 表示了滑面主体部分的摩擦系数 f_m 值的选取, 对稳定性系数 K 的影响。

表 2 说明, 如果对滑坡体结构的认识和参数选择是正确的, 则组成该滑坡体的前、中、后三个块体, 前部块体是比较稳定的, 后部块体稳定性最差, 属于推动式滑坡。在考虑滑坡处理时, 宜重视后部块体的处理。

与其它方法计算的结果相比较, 当 $f_m = 0.23$, $u = 0.05$, $\eta = 0.025$, 计算式(6) 计算的结果为 $K = 1.014$; 4 计算式(2) 计算的结果为 $K = 1.044$, 按典型剖面, 二维的 Samma 法计算的结果为 $K = 1.010$ 。总的说来, 三维计算的安全系数都比二维计算的结果大; 就计算式(1), (2) 与计算式(5), (6) 的计算结果相比较, 计算式(1), (2) 计算的安全系数较大。

4 岩体抗滑系数图谱分析

岩体稳定层分析方法的计算过程主要为图像与图像之间的计算。由于采用了这种可视性分析方式, 在计算过程中反映了坡体稳定性的不均一性, 使人们可

以得到另一些新的有关岩体稳定的概念。

4.1 抗滑系数图

将单个岩柱的抗滑力矩与下滑力矩之比(或抗滑力与下滑力之比), 称为“岩柱抗滑系数”。沿滑坡面, 岩柱抗滑系数在 $X - Y$ 坐标系的分布, 即“抗滑系数图”。抗滑系数图为 $X - Y$ 平面的数字模型, 记为 $[K]$ 。以碎裂岩坡层分析为例, 当安全系数采用式(5)或式(6) 计算时, 有

$$[K] = \left| \frac{([W] + [T] - [U][f])[\tan \phi] + [c']}{([\cos \alpha_y](1 + [\tan \alpha_y][\tan \phi]/K') \left| \left| ([W] + [T]) \times [\sin \alpha_y] + \eta([W] + [T])[R_d/R] \right| \right|} \right| \quad (7)$$

$$[K] = \left| \frac{([W](1 - [v_u]) + [T])[\tan \phi] + [c']}{([\cos \alpha_y](1 + [\tan \alpha_y] \times [\tan \phi]/K') \left| \left| ([W] + [T]) \times [\sin \alpha_y] + \eta([W] + [T])[R_d/R] \right| \right|} \right| \quad (8)$$

式中符号的意义同前。其中 K' 即式(5), (6) 计算得到的 K 值。

图 2 为当 $f_m = 0.23$, $v_u = 0.05$, $\eta = 0.025$ 时, 小浪底东苗家滑坡沿滑坡面的抗滑系数图(即 $[K]$)。该图表明: 后部滑体大部分处于不稳定状态; 中部滑体大部分稳定, 左侧较右侧稳定; 滑体前部抗滑系数很高, 是使整个滑体稳定的主要因素。

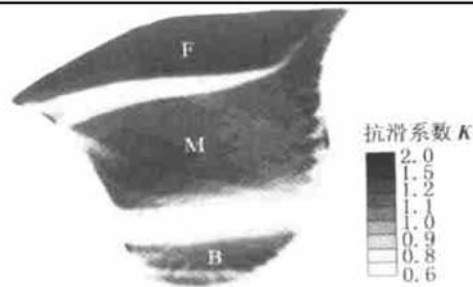


图 2 东苗家滑坡抗滑系数图

Fig. 2 Image of slide resistance factor of Dongmiaoja slide

抗滑系数图只是反映了滑坡体中稳定因素和非稳定因素的分布。由于简化 Bishop 方法忽略了岩柱间的摩擦力, 这种图中的岩柱抗滑系数只具有相对意义, 不能用来评价单个岩柱的稳定性。在岩体稳定分析中, 单岩柱稳定性的评价并无多大实际意义。

4.2 抗滑系数谱

岩石边坡, 特别是碎裂程度较高的岩坡, 发生滑坡时, 往往不是整体滑动。对一个潜在不稳定的边坡, 判断其不同部位稳定性的差异, 是有意义的。

岩体稳定层分析在建立了多层 DEM, 并将岩体模

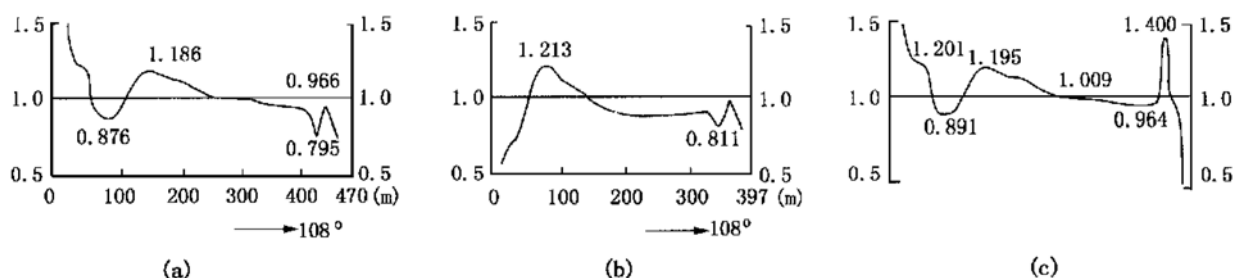


图3 东苗家滑坡抗滑系数谱

Fig. 3 The spectrum of slide resistance factor of Dongmiao family slide

型旋转使其最易滑动的方向与 Y 轴平行后,实际上已将岩体分割为许多平行于 $Y-Z$ 的岩体条带。若将各平行于 $Y-Z$ 的岩体条带的抗滑力矩与下滑力矩之比(或抗滑力与下滑力之比)称为“条带抗滑系数”(写作 K_i),则在垂直于滑动方向(X 方向)上依次排列的一系列岩体条带的“条带抗滑系数”,构成沿 X 方向的“抗滑系数谱”,即 K_i-X 曲线。“抗滑系数谱”反映了岩体在横向(X 方向)稳定性的差异。

以碎裂岩体分析式为基础,第 i 个条带的“条带抗滑系数”计算式为

$$K_i = \frac{\sum \left(([W]_i + [T]_i - [U]_i[f]_i) [\tan \phi]_i + [c']_i[f]_i \right) / ([\cos \alpha]_i (1 + [\tan \alpha]_i \times [\tan \phi]_i / K'))}{\sum \left(([W]_i + [T]_i) [\sin \alpha]_i + \eta ([W]_i + [T]_i) [R_d/R]_i \right)} \quad (9)$$

或

$$K_i = \frac{\sum \left(([W]_i (1 - [\gamma_u]_i) + [T]_i) [\tan \phi]_i + [c']_i[f]_i \right) / ([\cos \alpha]_i (1 + [\tan \alpha]_i \times [\tan \phi]_i / K'))}{\sum \left(([W]_i + [T]_i) [\sin \alpha]_i + \eta ([W]_i + [T]_i) [R_d/R]_i \right)} \quad (10)$$

式中所有数字模型后面有下标 i , $[?]_i$ 表示 $[?]$ 数字模型的第 i 数字列。其运算仍遵循层运算规则。

“条带抗滑系数”与通常计算的某剖面的“稳定性系数”的差异在于式(9), (10)中的 K' 与式(5), (6)中的 K' 不同。式(5), (6)中的 K' 是迭代参数;式(9), (10)中则用式(5), (6)岩体总体稳定性计算得到的 K 作为 K' , 不进行迭代计算。

图3为当 $f_m = 0.23$ 、 $\gamma_u = 0.05$ 、 $\eta = 0.025$, 小浪底东苗家滑坡的抗滑系数谱。

图3(a)为按碎裂岩体计算式计算的岩坡总体的抗滑系数谱;图3(b)为不考虑前部坡积层坡体,岩坡主体部分(M+B)的抗滑系数谱;图3(c)为按式(2)计算的岩坡总体的抗滑系数谱。该图表明了该滑坡体的左侧较

稳定,右侧较不稳定的特点。图3(a)与图3(c)比较可知,两种评价方法结果的主要差异在滑体边缘部分。

5 讨 论

(1)以岩坡信息系统(RSIS)为基础的分层分析方法,能充分地应用于各种勘探资料,使各种资料在空间较好地匹配,对岩体结构面的空间状况和各物理力学参数的空间分布,作准确、细致的描述。还可以对各种几何图像和参数分布图像,按不断获得的勘测、试验和监测资料进行修正。这是该方法的第一个优点。

(2)层分析方法是一种三维的分析方法,分析过程具有可视的特点。由此得到的抗滑系数图和抗滑系数谱,能较好地反映岩体稳定因素的不均匀性,对碎裂岩体的稳定分析和处理是有意义的。

(3)对复杂坡体,重要的是分析坡体不同部分的稳定性,发现最不稳定的块体。本文所述的方法可以作为这类分析的一种手段。

(4)以岩坡信息系统为基础的分层分析方法有待进一步发展。从理论上说,目前的各种边坡稳定分析方法,都可以改写为层分析模型,进而与岩坡信息系统相联。岩坡信息系统的一个重要功能在于其动态性。岩体稳定的层分析法与监测系统相联。可以开发其动态地预测预报的功能。

参考文献:

- [1] Hovland H J. Three dimensional slope stability analysis method [J]. ASCE J Geotech Eng Div, 1977, **103**: 971~ 986.
- [2] Chen R H, Chameau J L. Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes [J]. Geotechnique, 1982, **32**(1): 31~ 40.
- [3] Hungr O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions [J]. Geotechnique, 1987, **37**(1): 113~ 117.
- [4] 李冬田. 岩坡摄影地质测量与岩坡工程地质信息系统(RSIS) [J]. 河海大学学报, 1999, (1): 25~ 28.
- [5] 李冬田. 层分析在岩坡稳定分析中的应用 [J]. 工程地质计算机应用, 2000, (1): 12~ 15.